



COMBINED AOP-FENTON AND PHOTOCATALYSIS TECHNIQUE USING TiO₂/ZEOLITE COAL FLY ASH NANOCOMPOSITE FOR LABORATORY WASTEWATER TREATMENT

Linda Jati Kusumawardani*, Yulian Syahputri, Agel Figo Alfarsi
Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Science, Universitas Pakuan,
PO Box 452, Bogor, 16143, Indonesia;

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 Des 2024,

Revised 11 Apr 2025,

Accepted 14 Apr 2025,

Available online 02 May 2025

Keywords:

- ✓ AOP-Fenton;
- ✓ Photocatalysis;
- ✓ Waste Water;
- ✓ TiO₂/Zeolite;
- ✓ Nanocomposite

*corresponding author:

E-mail:

linda.wardani@unpak.ac.id

Phone: +6281289194042;

ABSTRACT

The increasing frequency of student laboratory activities has led to a rise in the generation of liquid waste, which must be adequately treated before being discharged into water bodies. Among the promising treatment methods is the Advanced Oxidation Process (AOP), particularly the Fenton process and photocatalysis. This study investigates the effectiveness of a combined AOP-Fenton and photocatalysis approach, employing a TiO₂/Zeolite-Coal Fly Ash nanocomposite for laboratory wastewater treatment. Key parameters—including chemical oxygen demand (COD), biological oxygen demand (BOD), total suspended solids (TSS), and total dissolved solids (TDS)—were analyzed before and after treatment. The AOP-Fenton process showed substantial pollutant removal, with reductions of 92.8% in COD, 92.6% in BOD, 62.3% in TSS, and 37.6% in TDS. Subsequent photocatalytic treatment, optimized at pH 4, a catalyst dosage of 8 g/L, and a radiation time of 180 minutes, further improved the treatment efficiency, achieving reductions of 97.05% in COD, 98.3% in BOD, 86.1% in TSS, and 81.6% in TDS. The final effluent quality complies with the Indonesian Ministry of Environment Regulation (PERMEN LH No. 5 of 2014) for Category 1 waste, confirming the effectiveness of the integrated treatment approach. This study highlights the potential of AOP-Fenton and photocatalysis as a sustainable solution for laboratory wastewater management.

ABSTRAK

Kombinasi Teknik AOP-Fenton dan Fotokatalisis Menggunakan Nanokomposit TiO₂/Zeolit Abu Terbang Batubara untuk Pengolahan Limbah Laboratorium

Aktivitas praktikum mahasiswa yang meningkat, menghasilkan limbah cair hasil dari kegiatan praktikum maupun penelitian di laboratorium pendidikan perguruan tinggi. Limbah cair yang dihasilkan tentunya harus diolah secara khusus sebelum dibuang ke perairan, alternatif pengolahan limbah laboratorium pendidikan yaitu metode *Advanced Oxidation Process* (AOP) proses fenton dan fotokatalisis. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil akhir pengolahan limbah cair laboratorium menggunakan kombinasi metode AOP proses fenton dan fotokatalisis menggunakan nanokomposit TiO₂/zeolit abu terbang batubara dengan parameter pengujian Kebutuhan Oksigen Kimia (COD), Kebutuhan Oksigen Biokimia (BOD), Total Padatan Tersuspensi (TSS) dan Total Padatan Terlarut (TDS). Hasil dari pengolahan limbah dengan teknik AOP-Fenton menunjukkan kenaikan efisiensi dalam menurunkan nilai keempat parameter, yaitu COD 92,8%; BOD 92,6%; TSS 62,30%; dan TDS 37,6%. Proses pengolahan dilanjutkan dengan teknik fotokatalisis pada kondisi optimum pH 4, dosis katalis 8 gram/L dan waktu radiasi 180 menit menunjukkan peningkatan efisiensi pada keempat parameter, yaitu COD 97,05%; BOD 98,3%; TSS 86,1%; dan TDS 81,6%. Hasil analisis limbah akhir pada keempat parameter dibandingkan dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup (PERMEN LH) No. 5 Tahun 2014. Disimpulkan konsentrasi limbah telah sesuai kriteria baku mutu limbah golongan 1.

Kata kunci: AOP-Fenton; Fotokatalisis; Limbah Cair; TiO₂/Zeolit; Nanokomposit

PENDAHULUAN

Limbah laboratorium dapat berasal dari bahan baku yang telah kadaluarsa, bahan habis pakai, sisa bahan kimia yang selesai digunakan,

dan sisa sampel yang diuji. Cara untuk menandai besarnya beban pencemaran pada air limbah yaitu dengan mengecek kandungan logam, senyawa organik dan zat pewarna yang ada didalam limbah



tersebut. Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup (Permen LH) No. 5 Tahun 2014 banyak parameter yang dapat digunakan untuk menentukan baku mutu air. Maka upaya meminimalisir dampak negatif yang ditimbulkan oleh aktivitas laboratorium kimia sangatlah penting (Mahedy et al., 2017). Beberapa tahun terakhir, penelitian tentang pengolahan limbah telah banyak dilakukan seperti filtrasi dan absorpsi pada pengolahan limbah laboratorium (Sulistiyanti et al., 2018), metode elektrokoagulasi untuk pengolahan limbah cair (Sukmawardani & Amalia, 2019), metode fotokatalis untuk mendegradasi senyawa fenol (Kusumawardani & Iryani, 2021), paraquat diklorida menggunakan fotokatalis TiO₂/Fe (Kusumawardani et al., 2020), metilen biru menggunakan TiO₂/Zeolit serta proses oksidasi.

Metode *Advance Oxidation Process* (AOP) biasanya digunakan untuk mendegradasi bahan kimia yang beracun secara biologis dan tidak dapat terurai (G. Zhang et al., 2018). AOP memiliki banyak keunggulan seperti harga yang murah, ramah lingkungan dan tersedia dalam jumlah yang banyak (Zhang & Li, 2024). Sedangkan metode fotokatalisis juga merupakan salah satu metode alternatif untuk pengolahan limbah cair, teknologi pengolahan limbah cair organik. Umumnya metode ini menggunakan bahan yang lebih efisien (Andarini et al., 2013). metode fotokatalisis dipilih karena merupakan metode yang efektif dalam menguraikan senyawa polutan menjadi senyawa yang lebih sederhana dan tidak berbahaya seperti H₂O dan CO₂ (Lubis et al., 2016).

Pada penelitian sebelumnya, zeolit dari limbah abu terbang batubara telah berhasil dimodifikasi dengan semikonduktor TiO₂ sebagai material adsorpsi-fotokatalisis menggunakan metode sol gel (Kusumawardani et al., 2023). Berdasarkan studi yang dilakukan tersebut nanokomposit yang dihasilkan memiliki sifat fisik dan optis yang dapat dimanfaatkan material untuk proses fotodegradasi polutan cair untuk limbah organik dan zat warna. Nanokomposit TiO₂/Zeolit memiliki energi celah pita 2,5 eV sehingga menggeser area kerja dari sinar UV ke area sinar tampak dengan efisiensi uji degradasi zat warna

metilen biru 5 mg/L selama 60 menit sebesar 79,3% dibawah sinar lampu halogen 1000 watt. Nanokomposit tersebut juga berhasil mendegradasi *metil orange* (Prakoso et al., 2024), metilen biru sebesar 100% pada konsentrasi 18 mg/L dengan dosis penambahan katalis 3 g/L, pH 12, penambahan H₂O₂ 8 mL dalam 1-liter sampel. Hal ini juga dibuktikan dengan analisis produk akhir degradasi metilen biru menggunakan *Liquid Chromatography - Tandem Mass Spectrometry* (LCMS/MS) (Kusumawardani et al., 2024). Namun, penelitian lebih lanjut tentang kemampuan material dalam pengolahan limbah laboratorium belum dilakukan, khususnya limbah laboratorium pendidikan.

Studi terhadap pengolahan limbah laboratorium pendidikan pada Universitas X telah dilakukan sebelumnya menggunakan metode AOP-Fenton (Imanudin, 2022). Studi ini menunjukkan bahwa pengolahan limbah laboratorium Universitas X menggunakan metode AOP-Fenton hanya menurunkan kualitas limbah sampai ke golongan II menurut Permen LH No. 5 Tahun 2014. Limbah golongan II masih termasuk ke dalam limbah yang belum dapat dibuang langsung ke perairan, sehingga masih diperlukan pengolahan lebih lanjut dengan mengembangkan metode pengolahannya.

Berdasarkan uraian yang telah dijabarkan, pada penelitian ini akan dilakukan studi terhadap dua kombinasi metode AOP-Fenton (Imanudin, 2022) dan fotokatalisis menggunakan nanokomposit TiO₂/Zeolit untuk pengolahan limbah laboratorium kimia Universitas X. Adapun nanokomposit TiO₂/Zeolit yang digunakan menggunakan hasil sintesis yang telah dibuat sebelumnya. Teknik AOP-Fenton yang dikombinasikan dengan teknik fotokatalisis menggunakan TiO₂/Zeolit diharapkan dapat menurunkan konsentrasi *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Total Suspended Solid* (TSS) dan *Total Dissolved Solid* (TDS) pada limbah cair dan sesuai dengan regulasi yang ditetapkan berdasarkan Permen LH No. 5 Tahun 2014. Proses degradasi fotokatalisis pada limbah cair laboratorium tersebut dipengaruhi oleh pH, dosis katalis yang ditambahkan pada sampel, serta waktu radiasi dibawah cahaya tampak. Studi ini

akan fokus pada optimasi variasi proses fotokatalisis, diantaranya variasi pH, yang dilakukan pada kondisi asam dan basa (pH 2 – 8), dosis katalis 2-8 gram/L, dan waktu radiasi 60-180 menit. Variasi tersebut dipilih merujuk pada penelitian sebelumnya (Kusumawardani et al., 2024) dan (Prakoso et al., 2024). Limbah laboratorium pendidikan kimia dilakukan analisis sebelum dan setelah proses pengolahan dengan parameter uji COD, BOD, TSS dan TDS. Hasil akhir pengolahan limbah cair kemudian dibandingkan dengan regulasi Permen LH No 5 tahun 2014.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan adalah nanokomposit TiO₂/Zeolit batubara (Kusumawardani et al., 2023), H₂O₂ 30% (p.a) dari Merck, buffer pH 4,7 dan 10, H₂SO₄ (p.a) dari Merck, besi (II) sulfat heptahidrat dari Merck, *aquadest* dan air limbah laboratorium kimia dari Universitas X. Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah neraca analitik, kaca arloji, sudip, desikator, kertas saring, corong kaca, cawan, batang pengaduk kaca, labu ukur 1000 mL, gelas ukur, erlenmeyer 500 mL, tanur, *hot plate*, *magnetic stirrer*, pH meter, lampu halogen 1000 watt (phillips), kuvet kaca, dan spektrofotometer UV-Visible (Genesys 10UV).

Metode

Pengolahan Limbah Cair Laboratorium dengan Teknik AOP-Fenton

Penelitian ini diawali dengan melakukan karakterisasi awal limbah laboratorium parameter COD, BOD, TSS, dan TDS. Tahapan selanjutnya limbah diolah dengan metode AOP-Fenton melalui penambahan H₂O₂ dan Fe²⁺. Proses ini dilakukan dengan memasukan 1 L limbah ke dalam piala ged. Limbah tersebut diaduk menggunakan pengaduk magnetik, limbah diatur sampai pH 3 dengan menambahkan H₂SO₄. Larutan diaduk selama 125 menit, setelah selesai,

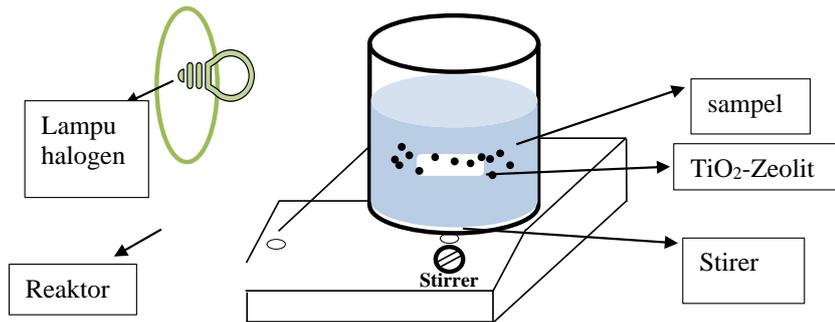
larutan didiamkan larutan selama 5 menit. Larutan diambil bagian atas (hingga tinggal bagian endapan) dan diatur pH nya agar diperoleh pH 7. Kemudian, larutan dianalisis nilai COD, BOD, TDS dan TSS.

Adapun reagen Fenton yang digunakan mengacu pada penelitian sebelumnya yang menggunakan perbandingan konsentrasi Fe²⁺: H₂O₂ adalah 1:10 (Imanudin, 2022). Selanjutnya, dalam memvariasikan rasio Fe²⁺ : H₂O₂, dosis H₂O₂ jumlahnya ditentukan dari kebutuhan H₂O₂ berdasarkan karakteristik COD dari sampel yang digunakan. Secara teoritis H₂O₂ sekitar 2,12 mg digunakan untuk mengoksidasi 1 mg BOD/COD (Kang & Hwang, 2000), maka dosis kebutuhan H₂O₂ dapat dihitung menggunakan persamaan 1.

$$\text{Konsentrasi H}_2\text{O}_2 = \text{Konsentrasi COD} \times 2,12 \dots\dots\dots(1)$$

Pengolahan Limbah Cair Laboratorium dengan Teknik Fotokatalisis Menggunakan Nanokomposit TiO₂/Zeolit Abu Terbang Batubara

Setelah proses pengolahan limbah cair dilakukan dengan metode AOP-Fenton, tahap selanjutnya dilanjutkan dengan pengolahan limbah dengan teknik fotokatalisis. Teknik ini dilakukan dengan melakukan optimasi proses pengolahan untuk memperoleh kondisi optimum pada variasi pH larutan (2; 4; 6; dan 8), dosis katalis (1, 2, 4, 6, dan 8 g/L) dan waktu radiasi sinar halogen 90, 120, 150 dan 180 menit. Pengujian kualitas limbah laboratorium kimia Universitas X dilakukan dengan analisis parameter COD, BOD, TSS, dan TDS pada setiap tahapan optimasi untuk mengetahui efektivitas degradasi limbah. Hasil akhir pengolahan limbah dibandingkan dengan Permen LH No. 5 Tahun 2014. Adapun model reaktor fotokatalitik yang digunakan untuk proses pengolahan limbah cair dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Model Reaktor Degradasi Fotokatalitik (Sistem *Batch*)

Tabel 1. Karakteristik Awal Limbah Laboratorium

Parameter	Baku mutu		Hasil Analisis (mg/L)
	Permen LH No.5 Tahun 2014		
	Golongan 1	Golongan 2	
COD	100	300	2.973,66
BOD	50	150	1803
TSS	200	400	748
TDS	2000	4000	6190

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Awal Limbah

Limbah cair laboratorium merupakan hasil kegiatan praktik laboratorium yang bersifat cair. Limbah cair laboratorium kali ini memiliki warna hijau pekat dengan padatan terlarut berwarna hitam, sampel limbah disimpan dalam jerigen yang tertutup rapat dan disimpan di tempat gelap. Karakterisasi awal sampel dilakukan analisis pada empat parameter yaitu COD, BOD, TSS dan TDS. Parameter ini akan dijadikan acuan maupun perbandingan untuk perlakuan selanjutnya.

Berdasarkan hasil analisis karakteristik awal limbah laboratorium kimia pada Tabel 1 diketahui bahwa karakteristik limbah laboratorium kimia Universitas X tidak memenuhi persyaratan baku mutu Permen LH No.5 Tahun 2014 baik COD, pH, TDS dan TSS. Limbah cair tersebut akan

diolah menggunakan kombinasi teknik AOP-Fenton dan Fotokatalisis hingga memenuhi baku mutu yang ditetapkan.

Pengolahan Metode AOP-Fenton

Limbah cair laboratorium direaksikan dengan FeSO₄·7H₂O dan H₂O₂ sebagai reagen fenton. Limbah yang dimasukkan ke dalam gelas piala yang dibalut dengan aluminium foil untuk mencegah adanya interaksi cahaya sehingga tidak terjadi proses foto-fenton. Penentuan rentang perbandingan H₂O₂:FeSO₄ sebesar 10:1 diperoleh dengan cara mendapatkan molaritas H₂O₂ yang sesuai dengan kondisi kadar COD dengan pH 3 dan waktu pengadukan 125 menit. Dalam prosesnya H₂O₂ akan dikatalis oleh Fe²⁺ menjadi hidroksil radikal yang selanjutnya akan mengoksidasi senyawa organik dan anorganik berdasarkan persamaan reaksi 2-4 (Jamil, 2024):



Tabel 2. Hasil Analisis Limbah Laboratorium Kimia setelah Proses AOP-Fenton

Parameter	Baku mutu		Hasil Analisis (mg/L)
	PerMen LH no.5 Tahun 2014		
	Golongan 1	Golongan 2	
COD	100	300	214
BOD	50	150	133,475
TSS	200	400	282
TDS	2000	4000	3860

Dari reaksi di atas dapat diketahui bahwa proses pengolahan limbah cair laboratorium menggunakan reagen H₂O₂-Fe²⁺ efektif pada kondisi asam. Hal ini disebabkan pada kondisi asam, ion Fe²⁺ yang dilepaskan ke dalam larutan lebih banyak. Ion Fe²⁺ ini bertindak sebagai katalis dalam dekomposisi H₂O₂ menghasilkan radikal hidroksil. Radikal hidroksil yang dihasilkan akan mengoksidasi senyawa organik maupun anorganik maka akan terbentuk hasil akhir CO₂ dan H₂O.

Namun, apabila suasana larutan basa, akan menyebabkan banyak terbentuknya ion OH⁻, sehingga ion H⁺ pada tahap regenerasi katalis Fe²⁺ akan berikatan dengan ion OH⁻ pada larutan dan akhirnya membentuk H₂O₂ kembali (Afzal et al., 2018). Selain itu, pada pH tinggi menyebabkan penurunan ion besi Fe²⁺ pada larutan, sehingga menghalangi berlangsungnya reaksi antara Fe²⁺ dengan H₂O₂ dan regenerasi Fe²⁺ dari Fe³⁺ (Koundle et al., 2024)

Sampel limbah cair laboratorium yang telah melalui proses AOP-Fenton dianalisis COD, BOD, TSS dan TDS untuk melihat kondisi limbah laboratorium setelah pengolahan. Hasil analisis limbah cair ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai keempat parameter tersebut mengalami penurunan yang sangat signifikan dari kondisi limbah awal. Namun, secara keseluruhan hasil pengolahan dengan metode ini masih menunjukkan kualitas limbah belum memenuhi syarat baku mutu golongan 1 (Afzal et al., 2018).

Nanokomposit TiO₂/Zeolit

Material yang digunakan dalam proses fotokatalisis dalam pengolahan limbah cair laboratorium merupakan nanokomposit TiO₂/Zeolit abu terbang batubara yang telah disintesis pada penelitian sebelumnya dengan

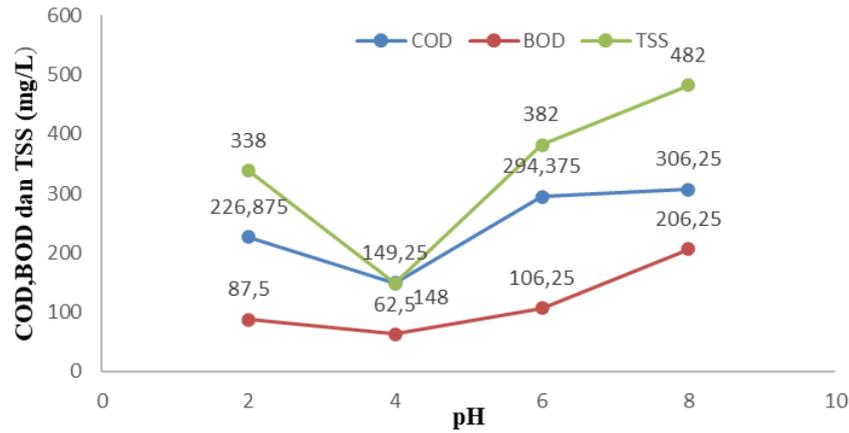
karakteristik material yang ditunjukkan pada Tabel 3. Hasil ini menunjukkan nanokomposit memiliki karakteristik yang potensial untuk dimanfaatkan dalam proses degradasi fotokatalitik. Namun, pengaplikasian nanokomposit tersebut sebagai material fotokatalis terhadap limbah cair belum ada studi lebih lanjut. Oleh karena itu, pada penelitian ini, TiO₂/Zeolit akan diaplikasikan untuk pengolahan pada limbah cair laboratorium kimia Universitas X.

Tabel 3. Hasil Karakterisasi Nanokomposit TiO₂/Zeolit (Kusumawardani et al., 2023)

Parameter Karakterisasi	Hasil Karakterisasi
<i>Band Gap</i>	2,50 eV
Luas Permukaan	189,483 m ² /g
Jenis Kristal	Anatase
Ukuran Kristal	9 nm

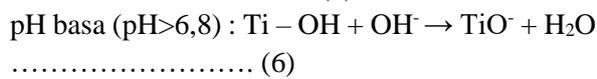
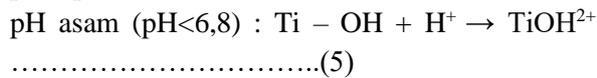
Pengolahan Metode Fotokatalisis Menggunakan Nanokomposit TiO₂/Zeolit Pengaruh Variasi pH Larutan

Pengaruh variasi pH untuk proses fotokatalisis limbah laboratorium dilakukan untuk mengetahui pH optimum yang digunakan dalam proses fotokatalisis limbah laboratorium. Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa nilai pH mempengaruhi proses fotodegradasi limbah laboratorium. Penurunan kadar COD, BOD dan TSS optimum terjadi pada pH 4, dikarenakan terdapat perbedaan muatan permukaan antara katalis dan larutan menyebabkan terjadinya interaksi permukaan katalis yang bermuatan positif dengan anion dari limbah laboratorium yang bermuatan negatif menghasilkan adsorpsi yang kuat (Sukmawardani & Amalia, 2019).



Gambar 2. Pengaruh Variasi pH terhadap Penurunan Konsentrasi COD, BOD dan TSS

Pada kondisi asam permukaan TiO₂ akan bermuatan positif, sehingga pembentukan ion H⁺ akan meningkat. Ion H⁺ akan berinteraksi dengan hidroksida (OH⁻) dan air (H₂O) sebagai sampel sehingga akan menghasilkan radikal hidroksil (•OH). Sebaliknya pada kondisi basa TiO₂ akan bermuatan negatif. Reaksi yang terjadi ditunjukkan pada persamaan reaksi 5-6.

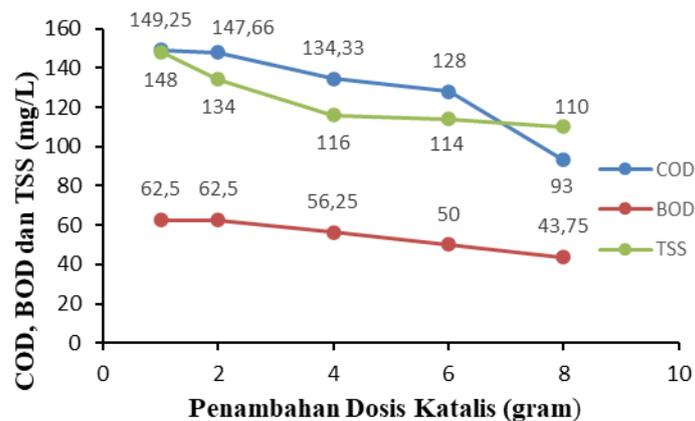


Pengaruh Variasi Dosis Katalis

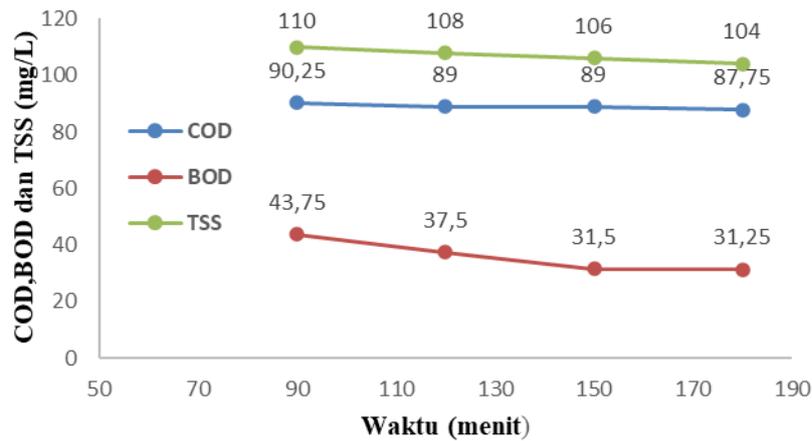
Salah satu faktor yang berpengaruh terhadap efisiensi proses fotodegradasi adalah banyaknya dosis katalis yang ditambahkan. Gambar 3 menunjukkan bahwa jumlah penggunaan katalis yang paling efektif untuk proses fotodegradasi yaitu 8 gram. Hal ini menunjukkan bahwa

nanokomposit TiO₂/Zeolit batubara berperan aktif sebagai fotokatalis, yang berarti semakin banyak penambahan massa katalis maka semakin banyak partikel TiO₂ yang akan bereaksi dengan air limbah (Rajaram et al., 2024).

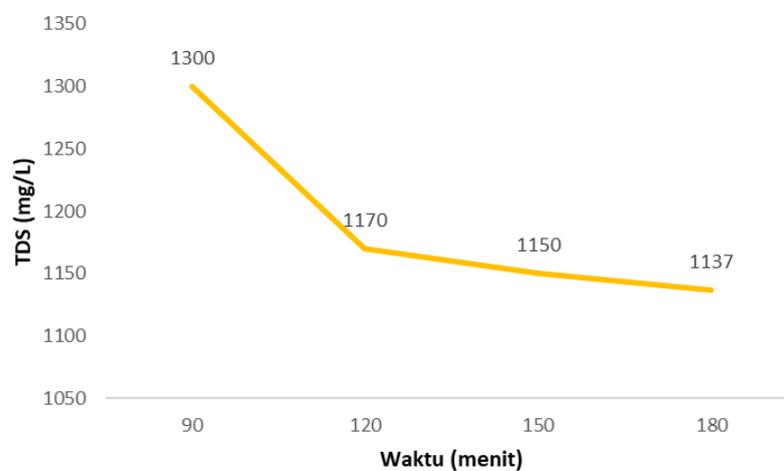
Penurunan COD yang terjadi setelah proses fotokatalisis ini disebabkan oleh reaksi reduksi yang menghasilkan •OH dan penggumpalan yang disebabkan oleh senyawa organik yang berikatan dengan ion positif (G. Zhang et al., 2018). Penggunaan metode fotokatalisis dengan variasi dosis katalis mampu menurunkan konsentrasi limbah dari laboratorium, diduga bahwa fotokatalis TiO₂/Zeolit batubara berfungsi secara optimum, sehingga dapat memproduksi radikal hidroksil (•OH). Semakin banyak dosis katalis yang digunakan, maka jumlah radikal hidroksil (•OH) yang terbentuk juga meningkat, mengingat •OH memiliki peran penting dalam proses degradasi senyawa organik (Ghosh et al., 2025).



Gambar 3. Pengaruh Variasi Dosis Katalis terhadap Penurunan Konsentrasi COD, BOD dan TSS



Gambar 4. Pengaruh Lama Waktu Radiasi terhadap Penurunan Konsentrasi COD, BOD dan TSS



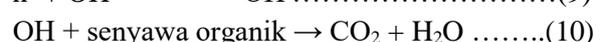
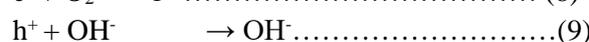
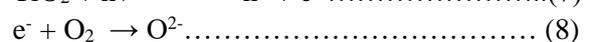
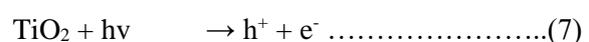
Gambar 5. Pengaruh Lama Radiasi terhadap Penurunan Konsentrasi TDS

Pengaruh Variasi Waktu Radiasi

Pengaruh waktu radiasi pada fotokatalisis limbah laboratorium dilakukan untuk mengetahui waktu optimum yang digunakan pada fotokatalisis limbah laboratorium. Setelah memperoleh nilai optimum dosis katalis dan pH, selanjutnya dilakukan studi terhadap pengaruh waktu radiasi. Fotokatalisis limbah laboratorium dilakukan dengan pH 4 dan dosis sebanyak 8 g dalam 1 liter larutan dengan sinar lampu halogen selama 60, 90, 120, 150 dan 180 menit. Radikal OH⁻ dan O₂ akan terus menerus terbentuk selama sinar halogen masih mengenai fotokatalisis dan akan mendegradasi senyawa organik menjadi CO₂ dan H₂O (Kim et al., 2021).

Hasil analisis setelah pengolahan pada Gambar 4 dan 5 menunjukkan bahwa dengan waktu penyinaran, interaksi antara cahaya halogen, limbah, dan nanokomposit TiO₂/Zeolit batubara semakin meningkat, yang

mengakibatkan semakin banyak foton yang diserap oleh fotokatalis dan molekul air. Hal ini menyebabkan proses fotokatalisis menjadi jauh lebih efisien (Fatimah et al., 2024). Ion hidroksida (OH⁻) akan menghasilkan radikal hidroksil (•OH), yang berfungsi untuk mengoksidasi senyawa organik yang dimaksud dan mengubahnya menjadi senyawa yang lebih sederhana seperti karbon dioksida dan air. Pada menit ke-180, konsentrasi akhir limbah laboratorium dengan parameter COD, BOD, TSS dan TDS telah mencapai batas baku mutu lingkungan. Mekanisme reaksinya dapat dilihat pada persamaan reaksi 7-10.



Pengolahan Kombinasi Teknik AOP-Fenton dan Fotokatalisis dengan Nanokomposit TiO₂/Zeolit

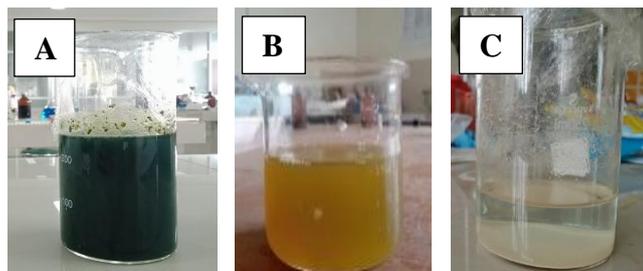
Pengolahan kombinasi metode AOP-Fenton dan fotokatalisis dengan nanokomposit TiO₂/Zeolit batubara telah dilakukan, dengan variasi pH, dosis katalis dan waktu radiasi dengan kondisi optimumnya yaitu ada di pH 4, dosis katalis 8 g dan 180 menit waktu radiasi. Perubahan fisik dan nilai konsentrasi pada limbah laboratorium terdapat perbedaan, setelah dilakukan AOP-Fenton dan fotokatalisis yaitu limbah laboratorium berubah warna dari hijau pekat menjadi jernih yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Dari Tabel 3 dapat terlihat konsentrasi COD, BOD, TSS dan TDS limbah cair laboratorium kimia dengan pengolahan AOP-Fenton masih termasuk kedalam ambang batas golongan 2 menurut baku mutu Permen LH No. 5 Tahun 2014. Namun, terjadi penurunan konsentrasi secara signifikan pada keempat parameter setelah melalui proses pengolahan fotokatalisis menggunakan TiO₂/Zeolit dengan nilai akhir konsentrasi COD 87,75 mg/L; BOD 31,25 mg/L; TSS 104 mg/L; dan TDS 1137 mg/L. Berdasarkan data tersebut, kualitas limbah cair laboratorium pendidikan Universitas X telah memenuhi

kategori 1 Permen LH No. 5 Tahun 2014. Oleh karena itu, penggunaan kombinasi teknik AOP-Fenton dan fotokatalisis pada pengolahan limbah cair laboratorium pendidikan Universitas X lebih efektif jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya, hanya menggunakan teknik AOP-Fenton.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, proses kombinasi pengolahan oksidasi tingkat lanjut (AOP Fenton-Fotokatalisis) dapat menurunkan kadar COD, BOD, TSS dan TDS hingga memenuhi baku mutu limbah Golongan 1 Permen LH No. 5 Tahun 2014. Kombinasi kedua teknik tersebut telah mencapai peningkatan efisiensi pengolahan pada masing-masing parameter yaitu COD 97,05%; BOD 98,3%; TSS 86,1%; dan TDS 81,6%. Penggunaan kombinasi teknik AOP-Fenton dan fotokatalisis pada pengolahan limbah cair laboratorium pendidikan Universitas X lebih efektif jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan hanya menggunakan teknik AOP-Fenton. Kondisi optimum pengolahan dengan teknik fotokatalisis berada pada pH 4, dosis katalis 8 gram/L dan waktu radiasi 180 menit.



Gambar 6. Penampakan Visual Limbah Awal sebelum Pengolahan (A), setelah Proses AOP-Fenton (B) dan setelah Proses Fotokatalisis (C)

Tabel 3. Hasil Pengolahan Akhir Limbah Cair setelah Fotokatalisis

Parameter	Sebelum Pengolahan (mg/L)	Baku Mutu PerMen LH No. 5 Tahun 2014 (mg/L)		Setelah Pengolahan (mg/L)	
		Golongan 1	Golongan 2	AOP-Fenton	Fotokatalisis
COD	2.973,66	100	300	214	87,75
BOD	1803	50	150	133,475	31,25
TSS	748	200	400	282	104
TDS	6190	2000	4000	3860	1137

DAFTAR PUSTAKA

- Afzal, T., Isa, M. H., & Raza Ul Mustafa, M. (2018). Removal of organic pollutants from produced water using Fenton oxidation. *E3S Web of Conferences*, 34. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183402035>
- Andarini, N., Wardhani, S., & Khunur, M. (2013). Fotodegradasi Zat Warna Jingga Metil Menggunakan TiO₂- Zeolit dengan Penambahan Anion Anorganik NO₃⁻. *Kimia Student Journal*, 1(1), 98–04.
- Fatimah, I., Wijayana, A., Dwiki Ramanda, G., Suratno, Sagadevan, S., Oh, W. C., & Doong, R. an. (2024). Highly active photocatalyst of nickel oxide nanoparticles green-synthesized using *Tinosphora cordifolia*-plant extract for photocatalytic oxidation of tetracycline. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100968>
- Ghosh, S., Zhang, G., Chen, Y., & Hu, J. (2025). The efficacies of degrading antibiotic resistance genes (ARGs) by applying UV light emitting diodes (UV-LEDs) based advanced oxidation processes (AOPs). *Water Research*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123197>
- Prakoso, I., Yunda Maharani, K., Rizki Ariq, M., Nurul Indah, A., Nurulindah Utami, A., Iryani, A., Syahputri, Y., & Jati Kusumawardani, L. (2024). Photodegradation of Methyl Orange (MO) Using TiO₂/Zeolite from Coal Fly Ash Waste Under Acidic Conditions and H₂O₂ Addition. *Helium: Journal of Science and Applied Chemistry*, 04(01). https://journal.unpak.ac.id/index.php/he_jsc
- Jamil, T. (2024). Role of advance oxidation processes (AOPs) in textile wastewater treatment: A critical review. In *Desalination and Water Treatment* (Vol. 318). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100387>
- Kang, Y. W., & Hwang, K.-Y. (2000). *Effects of Reaction Conditions on The Oxidation Efficiency In The Fenton Process*. www.elsevier.com/locate/watres
- Kim, M. G., Kang, J. M., Lee, J. E., Kim, K. S., Kim, K. H., Cho, M., & Lee, S. G. (2021). Effects of Calcination Temperature on the Phase Composition, Photocatalytic Degradation, and Virucidal Activities of TiO₂Nanoparticles. *ACS Omega*, 6(16), 10668–10678. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00043>
- Koundle, P., Nirmalkar, N., Momotko, M., Makowiec, S., & Boczkaj, G. (2024). Tetracycline degradation for wastewater treatment based on ozone nanobubbles advanced oxidation processes (AOPs) – Focus on nanobubbles formation, degradation kinetics, mechanism and effects of water composition. *Chemical Engineering Journal*, 501. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156236>
- Kusumawardani, L. J., & Iryani, A. (2021). Photocatalytic Degradation of Phenol Using TiO₂-Fe Under H₂O₂ Presence by Visible and Sunlight Irradiation. *Jurnal Kimia Valensi*, 7(2), 94–99. <https://doi.org/10.15408/jkv.v7i2.20766>
- Kusumawardani, L. J., Iryani, A., & Sinaga, E. L. (2023). Modification of Zeolite Made from Coal Fly Ash with TiO₂: Effect of Aging Time on Physical and Optical Properties. *Makara Journal of Science*, 27(1). <https://doi.org/10.7454/mss.v27i1.1483>
- Kusumawardani, L. J., Syahputri, Y., & Iryani, A. (2020). Photocatalytic Degradation of Paraquat Dichloride using TiO₂-Fe Nano Powder under Visible and Sunlight Irradiation. *Jurnal Kimia Valensi*, 6(1), 54–60. <https://doi.org/10.15408/jkv.v6i1.13625>
- Kusumawardani, L. J., Widyyanti, T., Iryani, A., Hasanah, U., & Nurlela, N. (2024). Optimization and Mechanism Elucidation of Catalytic Photodegradation Methylene Blue by TiO₂/Zeolite Coal Fly Ash Nanocomposite Under H₂O₂ Presence. *Jurnal Sains Natural*, 14, 98–108. <https://doi.org/10.31938/jsn.v>
- Lubis, I. S., Ramli, M., & Sheilatina. (2016). Photocatalytic Degradation of Indigo Carmine by TiO₂/Activated Carbon Derived From Waste Coffee Grounds. *Jurnal Natural*, 16(1), 21–26.

- Mahedy, L., Hammerton, G., Teyhan, A., Edwards, A. C., Kendler, K. S., Moore, S. C., Hickman, M., MacLeod, J., & Heron, J. (2017). Parental alcohol use and risk of behavioral and emotional problems in offspring. *PLoS ONE*, *12*(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178862>
- Imanudin, N. (2022). *Pengolahan Limbah Cair di Laboratorium Menggunakan Metode Advanced Oxidation Processes (AOP: H₂O₂-Fe²⁺)*.
- Rajaram, P., Jeice, A. R., & Jayakumar, K. (2024). Influences of calcination temperature on titanium dioxide nanoparticles synthesized using Averrhoa carambola leaf extract: in vitro antimicrobial activity and UV-light catalyzed degradation of textile wastewater. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *14*(17), 20665–20678. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04212-x>
- Sukmawardani, Y., & Amalia, V. (2019). Chemistry Laboratory Liquid Waste Treatment Using Electrocoagulation Method. *Jurnal Kartika Kimia*, *2*(2). <https://doi.org/10.26874/jkk.v2i2.29>
- Sulistiyanti, D., Antoniker, A., & Nasrokhah, N. (2018). Penerapan Metode Filtrasi dan Adsorpsi pada Pengolahan Limbah Laboratorium. *EduChemia (Jurnal Kimia Dan Pendidikan)*, *3*(2), 147. <https://doi.org/10.30870/educhemia.v3i2.2430>
- Zhang, G., Song, A., Duan, Y., & Zheng, S. (2018). Enhanced photocatalytic activity of TiO₂/zeolite composite for abatement of pollutants. *Microporous and Mesoporous Materials*, *255*, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.07.028>
- Zhang, M., & Li, X. (2024). Quantitative analysis of research literature on degradation of pollutants by Fenton and Fenton-like AOPs based on CiteSpace. In *Desalination and Water Treatment*, 320. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100894>